

船舶电池储能系统管理策略研究

卢地华, 陈自强, 周诗尧, 黄德扬

(上海交通大学 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘要: **目的** 降低船舶污染排放, 延长电池使用寿命, 改善变工况条件下储能系统的动力性。**方法** 电池系统采用基于经验模态分解及模糊控制的双层管理策略, 以磷酸铁锂电池组为主动动力源来承担平缓功率, 超级电容组为辅动力源来承担高频功率, 引入样本熵对功率信号进行评估。**结果** 以某船舶工况进行仿真, 相较于单一经验模态策略, 引入模糊修正策略后的磷酸铁锂电池组放电深度由 6.55%~94.35% 变为 14.56%~57.15%; 超级电容组的放电深度由 14.83%~52.11% 变为 12.7%~79.38%; 磷酸铁锂电池组功率信号样本熵值由 0.0182 降为 0.0177。**结论** 变工况条件下, 上述控制策略可降低单工况下柴油机平均燃油消耗, 减少储能端电池受到暂态功率的冲击, 延缓电池老化速度, 加长电池使用寿命, 提升船舶储能系统的可靠性及环保性。

关键词: 锂离子电池; 经验模态; 模糊控制; 电池寿命

中图分类号: U665.12; TM912

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)09-0057-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.09.009

Research on Management Strategy of Marine Battery Energy Storage System

LU Di-hua, CHEN Zi-qiang, ZHOU Shi-yao, HUANG De-yang

(State Key Laboratory of Ocean Engineering of Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: This paper aims to reduce pollution emissions from ships, extend battery life, and improve the dynamics of energy storage systems under variable operating conditions. The battery system adopts a two-layer management strategy based on empirical mode decomposition and fuzzy control. The lithium iron phosphate battery pack is used as the main power source to bear the smooth power, and the super capacitor pack is used as the auxiliary power source to take the high frequency power. The sample entropy is introduced to the power signal to evaluate. Compared with a single empirical mode strategy, the discharge depth of the lithium iron phosphate battery pack after the fuzzy correction strategy is changed from 6.55% ~ 94.35% to 14.56% ~ 57.15%; the super capacitor pack discharge depth from 14.83% ~ 52.11% to 12.7% ~ 79.38%; the entropy value of the power signal sample of the lithium iron phosphate battery pack decreases from 0.0182 to 0.0177. Under variable operating conditions,

收稿日期: 2020-06-21; 修订日期: 2020-07-02

Received: 2020-06-21; Revised: 2020-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51677119)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51677119)

作者简介: 卢地华 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电池系统能量管理及健康评估。

Biography: LU Di-hua (1995—), Male, Master's degree, Research focus: battery system energy management and health assessment.

通讯作者: 陈自强 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为能源综合管理、智能控制、智能制造。

Corresponding author: CHEN Zi-qiang (1964—), Male, Ph.D., Professor, Research focus: integrated energy management, intelligent control, intelligent manufacturing.

引文格式: 卢地华, 陈自强, 周诗尧, 等. 船舶电池储能系统管理策略研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(9): 057-063.

LU Di-hua, CHEN Zi-qiang, ZHOU Shi-yao, et al. Research on management strategy of marine battery energy storage system[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(9): 057-063.

the above control strategy can reduce the average fuel consumption of the diesel engine under single operating conditions, reduce the impact of transient power on the storage battery, delay the aging rate of the battery, extend the battery life, and improve the reliability of the marine energy storage system and environmental protection.

KEY WORDS: lithium ion battery; empirical mode; fuzzy control; battery life

随着科技发展,新能源利用技术逐步成熟,交通物流行业也成为能源高效清洁化的一大领域。船舶是当今重要的物流工具,实现其新能源化是社会发展的重要目标。近年来,IMO、欧盟等组织相继引入各种法规降低船舶污染,除去单次的污染(如燃油泄漏)外,航行过程造成的持续污染也十分恶劣^[1]。码头进出的运输船带来经济效益的同时,也污染了码头附近区域的环境^[2]。国际海事组织曾提议根据二氧化碳输出量和载物效能的比率来评价船舶的能源效率,其意义是防止航运的排放对水域造成严重污染^[3]。

为减少甚至杜绝船舶造成的各种污染,在船舶储能系统中引入电池系统受到了航运界的关注。近年来储能电源技术的优化改进使锂离子动力电池表现出了巨大的发展潜力,其零记忆效应、高平台电压、高能量密度、低自放电率和强安全性等众多优点受到了很多企业的青睐。然而,船舶航行期间不可避免地会遇到恶劣水况,传统柴油机推进在变工况环境中无法保持运行于燃油高效区间,单一储能端动力电池系统虽有高的能量密度,但是其功率密度相对较低,导致其在船舶过渡工况下也无法有效地瞬时大电流充放电,影响整船的经济性,且对电池的损害较大,加速电池的老化,缩短其运行期限。超级电容器在充放电过程中均不出现化学反应,具有很高的功率密度,允许瞬时大电流充放电。由于成本和占地空间的问题,能量密度较低的超级电容器一般不单独使用,故将其结合价格相对经济的锂离子动力电池构成电池储能系统是解决船用储能技术可行的方法。

北京交通大学的刘月晨^[4]针对储能系统中的组件超级电容和锂电池提出了实时监测的能效反馈方法,但是此方法尚不具备实时调控系统状态的能力。武汉理工大学的杨诚^[5]针对某型号挖泥船采用超级电容器模块和蓄电池模块组成复合船用储能系统来应对负载信号频率波动,但是此方法主要以蓄电池状态作为调控因子,未对储能组件状态进行拆分考虑。华南理工大学的罗玉涛、刘秀田等人^[6]为解决锂电池的局限性,提出基于NEDC工况验证的电网参数匹配方法,以此来延长锂电池的使用寿命,但是其策略基于逻辑门限值控制,储能介质状态的自适应调整性受到限制。

针对上述问题,文中在传统船舶储能系统中引入电池储能系统,基于信号序列时间尺度局部特性设计储能系统自适应双层能量管理策略,并通过实验及仿真验证该研究能够实时有效地改善船舶储能系统动态响应性能。

1 船舶储能系统设计

由于动力源装置具有不同的工作属性,实际运行时,需要考虑各自的特点,且系统作业过程相对复杂,因此需要建立合适的架构模型^[7]。通过分析船用储能动力源的特性,在传统船舶储能系统中引入锂离子动力电池组和超级电容组成的电池系统^[8],并对所选锂离子电池进行了实验测试。所设计的储能系统架构如图1所示。

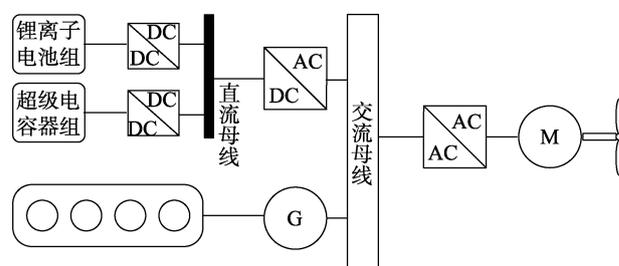


图1 储能系统总体架构

Fig.1 Overall architecture of energy storage system

上述结构动力源端有锂离子电池组、超级电容器组和柴油发电机组,前面二者分别通过DC/DC变换器后,汇入直流母线,再由逆变器及三相变压器隔离后,汇入交流母线。交流母线与电机间进行能量传递,推进螺旋桨运动。

1.1 锂离子动力电池的建模

动力电池常用的建模方式有电化学模型和等效电路模型^[9],前者虽然能够精确描述电池内部特性,但其架构复杂,计算量大,不适用于文中所设计的整体电池组系统;后者是一种研究电流作用下电池输出特性的模型,其计算简易,输出直观,能很好地模拟电池的动态特性。文中采用一种简化的等效电路模型,其结构如图2所示。

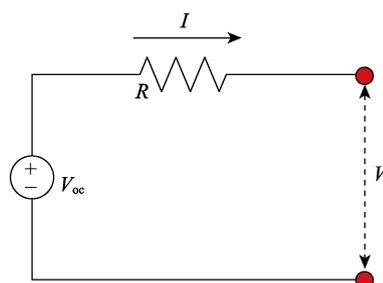


图2 简化等效电路模型

Fig.2 Simplified equivalent circuit model

根据基尔霍夫电压定律 (KVL), 有:

$$V = V_{oc} + IR$$

引入电池功率:

$$P_{bat} = VI$$

则有:

$$VI = V_{oc}I + I^2R$$

解出电流的表达式为:

$$I = \frac{(-V_{oc} + \sqrt{V_{oc}^2 + 4RP_{bat}})}{2R}$$

引入电池荷电状态 Q_{SOC} , 定义为剩余容量占电池额定容量的比值:

$$\frac{dQ_{SOC}}{dt} = \frac{I}{Q_{bat}}$$

Q_{bat} 为电池的额定容量, 则有:

$$Q_{SOC}(t) = \int \frac{I(t)}{Q_{bat}} dt + Q_{SOC}(t_0)$$

1.2 锂离子动力电池的特性实验

电池的开路电压 (Open Circuit Voltage, OCV) 是表征外电路断路时电池正负端间存在的恒定电势差^[10], 其对电池的 Q_{SOC} 估计结果影响直接, 需要通过设计合理的测试试验来获取其精确数值, 一般可采用静置充放电试验进行 OCV 试验。磷酸铁锂电池 25 °C 的 OCV 实验数据如图 3 所示。电池内阻常用测算方法是利用 HPPC (Hybrid Pulse Power Characteristic) 测试的脉冲充电、放电过程中电池端电压的变化来计算。文中所选磷酸铁锂电池的阻抗特性如图 4 所示。

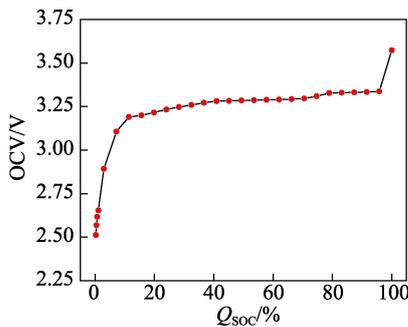


图 3 25 °C 下磷酸铁锂 OCV

Fig.3 OCV of lithium iron phosphate at 25 °C

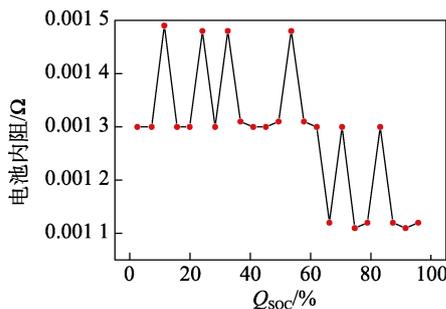


图 4 25 °C 下磷酸铁锂欧姆内阻曲线

Fig.4 Ohmic internal resistance curve of lithium iron phosphate at 25 °C

1.3 超级电容建模

超级电容具有高的功率密度^[11], 其常用的电路模型有经典阻容模型和三支路模型等, 前者由于其结构简单、参数辨识简易而被广泛使用, 其模型结构如图 5 所示。

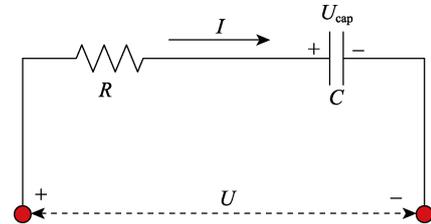


图 5 超级电容经典阻容模型

Fig.5 Classic resistance-capacitance model of supercapacitors

电容两端开路电压为:

$$U_{cap} = \frac{Q_{cap}}{C}$$

根据基尔霍夫电压定律 (KVL), 负载电压及开路电压有:

$$U = U_{cap} - IR$$

超级电容中电阻和电容可以表示为:

$$R = f(I)$$

$$C = f(I)$$

则超级电容的荷电状态可以表示为:

$$Q_{SOC} = \frac{Q - Q_{consumption}}{Q}$$

虽然超级电容外部参数可以通过试验直接进行测量, 但是具体的内部参数(如等效内阻和理想电容)需计算得到。

1.4 船舶推进系统建模

船体推进系统建模对后续的优化处理至关重要^[12]。根据船舶纵向动力学, 船舶质量 m 、航速 v 及单个螺旋桨推力 T 之间存在如下关系:

$$m \frac{dv}{dt} = n_p T (1 - c_1) - R_{resis}$$

式中: n_p 为螺旋桨的数量; c_1 为减阻系数; R_{resis} 为船舶阻力。

$$T = K_1 n^2 D^4 \rho$$

$$R_{resis} = \frac{1}{2} C_1 \rho v^2 S + \frac{1}{2} C_2 \rho v^2 S + \frac{1}{2} C_3 \rho v^2 A_t$$

式中: K_1 为推力系数; n 为螺旋桨转速; D 为螺旋桨直径; ρ 为水的密度; 船舶阻力右边三项分别表示摩擦阻力、兴波阻力及空气阻力, C_1 、 C_2 、 C_3 分别为其系数。根据以上关系, 便可联合船速及螺旋桨尺寸等数据获取螺旋桨转速及特性数据。

2 储能系统管理策略

在所设计船舶储能系统中, 为应对不同水况下功

率信号的变化波动，需制定良好的船舶能量管理策略。文中采用的控制策略分为两大部分，即柴油机和电池系统间的控制及电池系统内部间的控制，前者基于规则进行控制，后者策略主要包括三大模块，即经验模态分解控制模块、电池系统荷电状态模块和模糊修正模块。总体结构应满足以下3点要求^[13]：

- 1) 优化利用储能端电池的高能量特性和储能端电容器的强功率特性。
- 2) 降低储能端电池的损耗，减缓其老化速率，提高其运行期限。
- 3) 增大储能系统的反馈（充电）效率，降低柴油机的燃油消耗。

2.1 储能系统首层策略

船舶储能系统的第一层策略为柴油机和电池系统间的能量管理。文中首层策略采用基于柴油机万有特性的规则进行功率分配，具体优化目标为发电柴油机的燃油消耗率^[14]。将柴油机需承担功率限定在一个波动范围相对较小的功率值，从而限定转速及扭矩运行于高效范围区间内，使单个工况下平均燃油消耗率降低。

2.2 电池系统管理策略

电池系统内部的能量管理策略采用基于经验模态分解（EMD, Empirical Mode Decomposition）的方法进行主分解，经验模态分解是一种新型的自适应信号的时频处理方法^[15]，尤其适用于非线性的非平稳的信号分析处理。其原理是对原始信号进行 EMD 分解获得本征模函数（IMF, Intrinsic Mode Function）。EMD 分解具有两个前提条件^[16]：原数据至少有 2 个极值，一个极小值和一个极大值；样本数据的局部时

域特性是由极值点间的时间尺度唯一确定，且若无极值点但有拐点，则可对数据微分一次或多次求得极值，然后再通过积分来获得分解结果。所得 IMF 分量应该满足条件：分解后，不存在负的局部极大值和正的局部极小值，否则说明这还不是一个本征模函数，需要对新数据继续进行分解。EMD 分解的具体步骤如图 6 所示。

首层分解后，进入电池系统功率 EMD 分解图像，如图 7 所示。由图 7 可知，原始信号（signal）被分为 6 项，分别是 IMF（1—5）及 Residual 项。IMF（1—5）项频率依次减小，电池系统内部初分解的原则是超级电容承担高频部分，锂离子电池承担低频部分及余项。

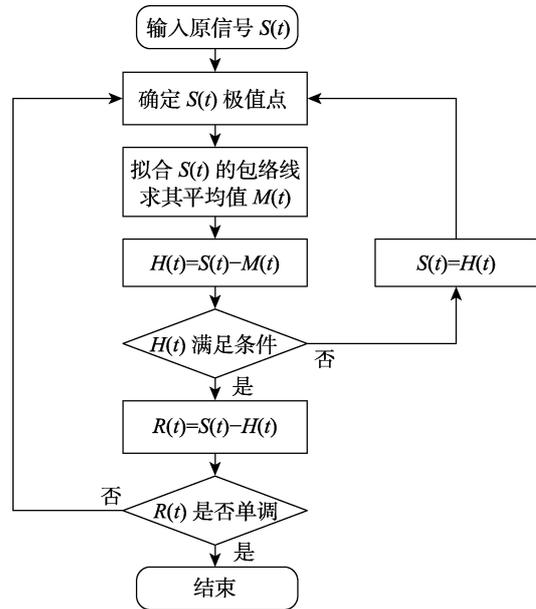


图 6 经验模态分解流程
Fig.6 Empirical mode decomposition process

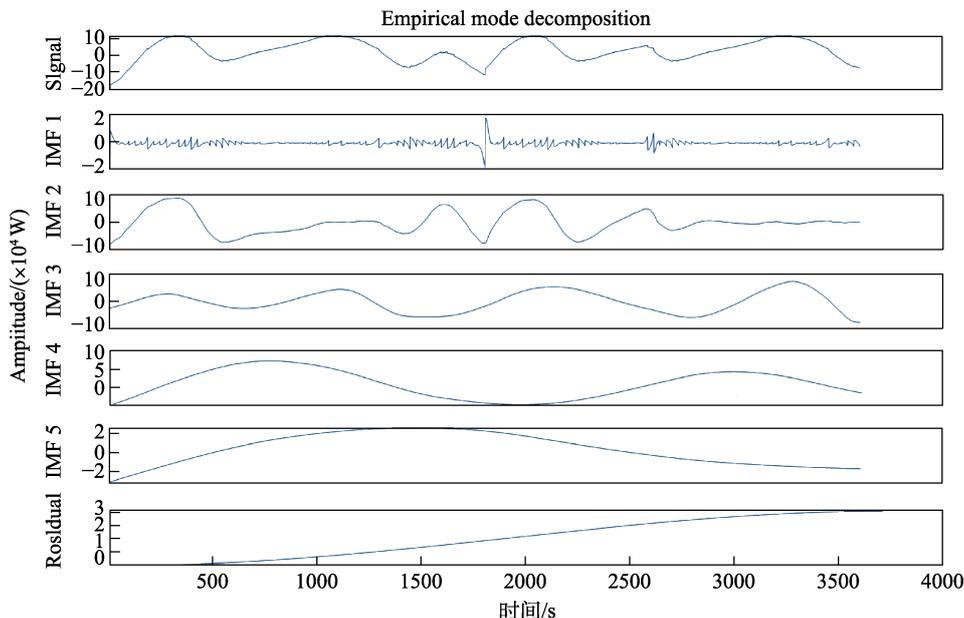


图 7 电池系统功率信号 EMD 图层
Fig.7 EMD layer of battery system power signal

2.3 模糊修正策略

上述单纯的经验模态策略由于未考虑到储能端电池和储能端电容器的实时荷电状态 (SOC)，因此无法满足系统动力特性和经济特性的最优化要求^[17]。文中采用模糊修正思路，联合储能端电池和电容器的实时荷电状态 (SOC) 及经验模态初始分配信号

进行修正^[18]。控制策略是基于电池系统的总需能耗而设计的，以初次分配后的储能端电池所分功率、储能端电容器的实时荷电状态以及储能端电池的实时荷电状态作为输入量，储能端电容器所需功率占电池系统总功率权重系数 K 为输出变量。根据输入功率正负，分为两个模糊控制器，相关模糊规则如图 8 所示。

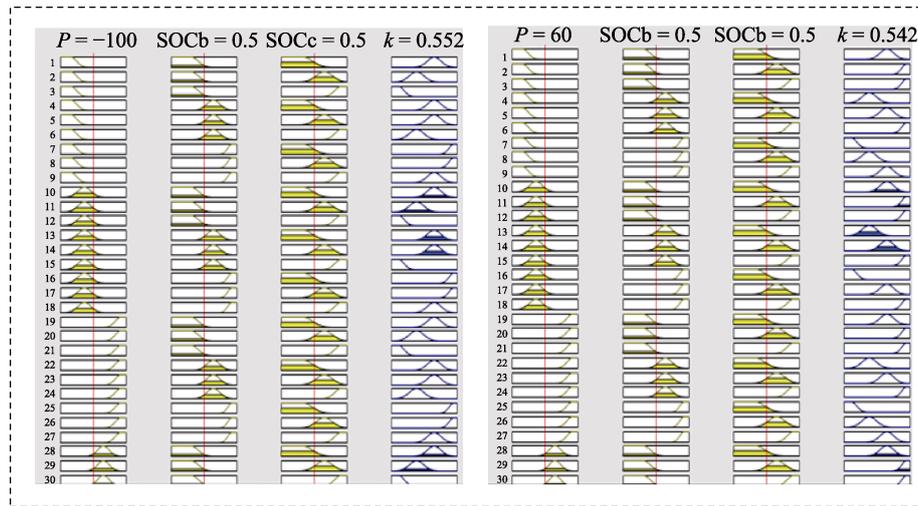


图 8 模糊控制器修正规则
Fig.8 Amendment rules of fuzzy controller

2.4 样本熵评价策略

文中策略具体优化目标为锂离子电池承担低缓频率功率，超级电容承担高频功率，故引入样本熵对功率信号进行评价。样本熵值是一种通过度量功率信号中产生新模式概率大小来衡量时间序列复杂性的评价指标^[19]，其首先将功率信号离散为 N 个数据，组成时间序列：

$$\{x(n)\} = x(1), x(2), \dots, x(N)$$

然后按序号组成一组维数为 m 的向量序列，令： $X_m(i) = \{x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)\}$ 序列为 $X_m(1), X_m(2), \dots, X_m(N-m+1)$ 。定义 $X_m(i)$ 与 $X_m(j)$ 间距为：

$$d[X_m(i), X_m(j)] = \max_{k=0,1,\dots,m-1} (|x(i+k) - x(j+k)|)$$

对于给定的 $X_m(i)$ ，计算出间距小于 r 的 j 的数目，并记作 B_i ，对于 $1 \leq i \leq N-m$ ，定义：

$$B_i^m(r) = \frac{1}{N-m-1} B_i$$

$$B^m(r) = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} B_i^m(r)$$

令维数 $m = m+1$ ，对于给定的 $X_{m+1}(i)$ ，计算出间距小于 r 的 j 的数目，并记作 A_i ，定义：

$$A_i^m(r) = \frac{1}{N-m-1} A_i$$

$$A^m(r) = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} A_i^m(r)$$

则样本熵定义为：

$$SampEn(m, r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left\{ -\ln \left(\frac{A^m(r)}{B^m(r)} \right) \right\}$$

采用重构维数 $m=2$ ，阈值 $r=0.15 \times$ (功率信号数据标准偏差)，用于计算功率信号的样本熵。

3 仿真实验

文中以如图 9 所示的某船舶工况船速数据进行仿真验证，搭建船用储能系统模型。首层策略处理后的电池系统功率通过 EMD 进行初分解，模糊控制进行精修正，对比修正前后电池系统各介质实时状态的变化。首层分入电池系统的功率如图 10 所示。

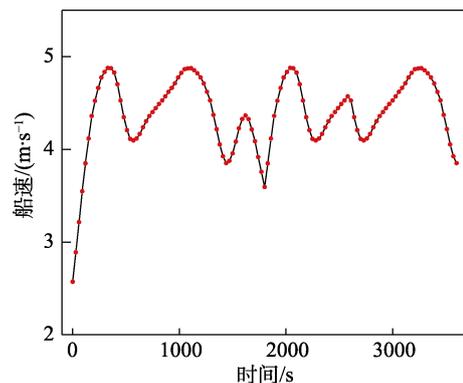


图 9 仿真原始船速数据
Fig.9 Simulation of original ship speed data

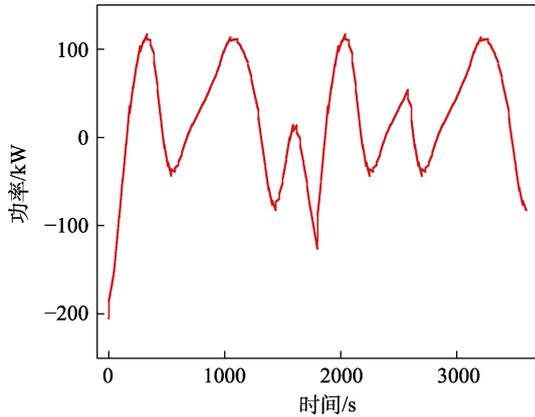


图 10 首层分入电池系统功率

Fig.10 Battery system power split from the first layer

3.1 仿真实验结果

电池储能系统试验设置两组模型分别展开仿真验证,参照组为单一 EMD 管理策略,实验组为基于模糊修正的 EMD 管理策略。电池组初始 Q_{soc} 设置为 80%, 超级电容组初始 Q_{soc} 设置为 75%。引入样本熵对实验结果进行评估,具体仿真试验结果如图 11—13 所示。

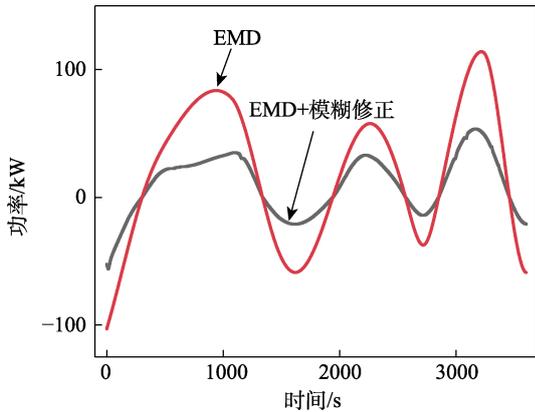


图 11 锂离子电池功率修正前后对比

Fig.11 Comparison of lithium battery power

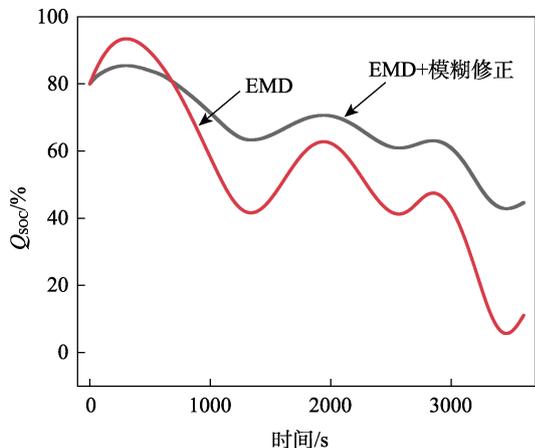


图 12 锂离子电池 Q_{soc} 修正前后对比

Fig.12 Comparison of lithium battery Q_{soc}

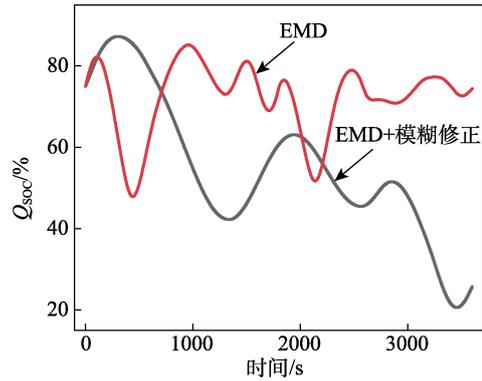


图 13 超级电容 Q_{soc} 修正前后对比

Fig.13 Q_{soc} comparison of super capacitors

3.2 实验结果分析

由锂离子电池前后功率对比(见图 11)可知, EMD 分解后的功率在修正前后有较大区别,修正后的功率明显更加平缓,数据离散处理的样本熵值由原来的 0.0182 降低为 0.0177。由锂离子电池修正前后 Q_{soc} 对比(见图 12)可知,电池修正后的放电深度范围由原来的 6.55%~94.35%变为 14.56%~57.15%。由超级电容修正前后 Q_{soc} 对比(见图 13)可知,超级电容修正后的放电深度范围由原来的 14.83%~52.11%变为 12.7%~79.38%。

由以上结果可知,单纯的 EMD 策略未考虑到储能端电池及电容的荷电状态,无法发挥超级电容大区间充放电优势。模糊修正策略可以将上述缺陷进行弥补,使磷酸铁锂电池组承担更加平缓的功率,充分发挥储能系统磷酸铁锂电池组的能量特性和超级电容组的功率特性,避免电池过充过放,可减缓电池老化速率^[20],提升电池组运行期限。

4 结语

文中所研究船舶储能系统相对于传统纯油耗船舶储能系统而言,可以优化柴油机运行的平均燃油消耗率,极大地减少船舶的污染排放。根据电池系统的性能特点,联合电池的特性实验及建模设计了基于经验模态的模糊修正策略。仿真实验从电池系统总需功率出发,分析了储能端电池、储能端电容器、输入系统功率的变化特点。针对储能端电池 EMD 处理的结果,采用模糊控制加以修正,极大地优化了能量管理的精确性。

文中采用的电池储能系统管理策略可满足船舶变工况条件下航行的能量供给,减少单工况下柴油机的平均燃油消耗率,充分发挥储能端电池组的高能量特性和储能端电容器组的强功率特性。在稳定直流母线电压波动的同时,减少储能端电池频繁充放电,避免电池过充过放,减缓电池老化速率,延长电池使用寿命的同时提升系统动态响应性能,为恶劣海况下船舶机动操纵性控制设计提供了借鉴。

参考文献:

- [1] 王耀霖. 船舶尾气高效脱硝系统的开发与优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
WANG Yao-lin. Development and optimization of high efficient marine urea-SCR systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [2] 李丽平, 高颖楠, 周婷, 等. 借鉴美国经验控制我国船舶大气污染[J]. 环境保护, 2015, 43(1): 64-66.
LI Li-ping, GAO Ying-nan, ZHOU Ting, et al. Control on air pollution from ships by learning the American experiences[J]. Environmental protection, 2015, 43(1): 64-66.
- [3] 王分良. EEDI 时代的船舶减排[J]. 中国船检, 2009(8): 62-65.
WANG Fen-liang. Ship emission reduction in the era of EEDI[J]. China ship survey, 2009(8): 62-65.
- [4] 刘月晨. 锂离子电池公交车与超级电容公交车系统能量效率及能耗综合分析及系统优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
LIU Yue-chen. Energy Efficiency&Consumption analysis and system optimization of lithium ion battery bus system and supercapacitor bus system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [5] 杨诚. 复合储能装置在船舶电力推进系统中的应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
YANG Cheng. Study on the application of hybrid energy storage device in the marine electric propulsion system[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [6] 罗玉涛, 刘秀田, 梁伟强, 等. 延长锂离子电池寿命的电动汽车复合电源设计[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(3): 51-59.
LUO Yu-tao, LIU Xiu-tian, LIANG Wei-qiang, et al. Design of hybrid power system for prolonging lifespan of lithium-ion battery applied to electric vehicles[J]. Journal of South China university of technology (natural science edition), 2016, 44(3): 51-59.
- [7] 周诗尧, 陈自强, 黄德扬, 等. 轻度混合动力船舶储能系统研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(12): 55-59.
ZHOU Shi-yao, CHEN Zi-qiang, HUANG De-yang, et al. Energy storage system of mild hybrid ship[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(12): 55-59.
- [8] SONG Zi-you, HOFMANN H, LI Jian-qiu, et al. Optimization for a hybrid energy storage system in electric vehicles using dynamic programming approach[J]. Applied energy, 2015, 139: 151-162.
- [9] 黄德扬, 陈自强, 郑昌文. 时变温度环境下锂离子电池自适应 SOC 估计方法[J]. 装备环境工程, 2018, 15(12): 28-34.
HUANG De-yang, CHEN Zi-qiang, ZHENG Chang-wen. SOC adaptive estimation method for Li-ion battery applied in temperature-varying condition[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(12): 28-34.
- [10] 周诗尧, 陈自强, 郑昌文, 等. 全海深深潜器所用动力锂离子电池电气特性[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(1): 49-54.
ZHOU Shi-yao, CHEN Zi-qiang, ZHENG Chang-wen, et al. Electrical characteristics of power lithium-ion batteries for full ocean depth submersible[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong university, 2019, 53(1): 49-54.
- [11] 张纯江, 董杰, 刘君, 等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 334-340.
ZHANG Chun-jiang, DONG Jie, LIU Jun, et al. A control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2014, 29(4): 334-340.
- [12] 席龙飞. 船舶油电混合动力系统建模与仿真[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
XI Long-fei. Modeling and simulation research of marine diesel-electric hybrid system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [13] 兰熙, 沈爱弟, 高迪驹, 等. 混合动力船舶能量管理系统的最优控制[J]. 电源技术, 2016, 40(9): 1859-1862.
LAN Xi, SHEN Ai-di, GAO Di-ju, et al. Optimal control of hybrid ship energy management system[J]. Chinese journal of power sources, 2016, 40(9): 1859-1862.
- [14] 徐丹. 柴油机燃烧室及喷油系统多参数优化匹配研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
XU Dan. Multi-parameters optimization matching study of diesel engine combustion chamber and fuel injection system[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [15] ZHANG Jing-ling, HUANG Da-wen, YANG Jian-hua, et al. Realizing the empirical mode decomposition by the adaptive stochastic resonance in a new periodical model and its application in bearing fault diagnosis[J]. Journal of mechanical science and technology, 2017, 31(10): 4599-4610.
- [16] 史林军, 周佳佳, 温荣超, 等. 基于经验模态分解与小波分析相结合的风电功率平滑控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 9-16.
SHI Lin-jun, ZHOU Jia-jia, WEN Rong-chao, et al. Power smoothing control of wind power based on combination of empirical mode decomposition and wavelet analysis[J]. Power system protection and control, 2016, 44(24): 9-16.
- [17] ERDINC O, VURAL B, UZUNOGLU M. A wavelet-fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicular power system[J]. Journal of power sources, 2009, 194(1): 369-380.
- [18] 雷克兵, 汤旭晶, 周诗尧, 等. 船舶混合锂离子电池储能系统功率分配研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(12): 16-22.
LEI Ke-bing, TANG Xu-jing, ZHOU Shi-yao, et al. Power allocation of energy storage system for marine hybrid lithium ion battery[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(12): 16-22.
- [19] 赵志宏, 杨绍普. 一种基于样本熵的轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2012, 31(6): 136-140, 154.
ZHAO Zhi-hong, YANG Shao-pu. Sample entropy-based roller bearing fault diagnosis method[J]. Journal of vibration and shock, 2012, 31(6): 136-140, 154.
- [20] 刘健, 陈自强, 黄德扬, 等. 基于等压差充电时间的锂离子电池寿命预测[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(9): 1058-1065.
LIU Jian, CHEN Zi-qiang, HUANG De-yang, et al. Remaining useful life prediction for lithium-ion batteries based on time interval of equal charging voltage difference[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong university, 2019, 53(9): 1058-1065.